

## بررسی پاسخ حرکات سکوی پایه کششی تحت اثر بارگذاری امواج دریای خزر

مجید قدسی حسن آباد<sup>۱</sup>، حمیدرضا زارع تیموری<sup>۲</sup> و مجتبی عظام<sup>۳</sup>

m.ghodsi.h@gmail.com

۱- استادیار دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات تهران

۲- دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

۳- استادیار دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات تهران

### چکیده

سکوی پایه کششی نوعی سکوی تطبیقی است که به منظور استخراج نفت در آب‌های بسیار عمیق مورد استفاده قرار می‌گیرد. از آنجا که نقاط نفت‌خیز دریای خزر دارای عمق زیاد می‌باشند، انجام مطالعات در مورد این سکوها در آب‌های عمیق ضروری می‌باشد. یکی از اصلی‌ترین پارامترها در سکوه‌های پایه کششی محاسبه جابجایی‌های افقی، قائم و زاویه‌ای سکو می‌باشد. جابجایی‌ها تأثیر بسیاری بر تنش‌های وارد بر تاندون‌ها دارند. از آنجا که مشخصه اصلی سکوه‌های پایه کششی مهار این سکوها توسط تاندون‌ها می‌باشد، بنابراین محاسبه این جابجایی‌ها در مراحل طراحی و ساخت، اهمیت بسیاری دارند. با در نظر گرفتن شرایط امواج دریای خزر بر روی سکوی مدل‌سازی شده در نرم‌افزار ABAQUS، نیروی موج با استفاده از معادله موریسون محاسبه شده و با انجام تحلیل دینامیکی و استاتیکی، پاسخ‌های سکو برای حرکات Surge، Sway و Heave و حرکات زاویه‌ای Roll، Pitch و Yaw مورد بررسی قرار گرفته شده است. با تغییر زاویه موج برخوردی و همچنین تغییر بارگذاری سکو پاسخ‌های مختلف سازه ارائه شده است. هدف از این تحقیق تحلیل استاتیکی و دینامیکی نوعی از این سکو در آب‌های عمیق دریای خزر و ارائه نتایج حاصله از پاسخ‌های سکو در حرکات مختلف با توجه به تحلیل هیدرودینامیکی سکو می‌باشد.

**واژگان کلیدی:** آب عمیق، سکوی پایه کششی، تاندون، معادله موریسون، پاسخ سکو.

تاریخ دریافت مقاله : ۹۳/۰۷/۱۶

تاریخ پذیرش مقاله : ۹۴/۰۴/۲۲

## ۱- مقدمه

با افزایش عمق آب، هزینه سکوه‌های ثابت افزایش می‌یابد، در نتیجه در آب‌های عمیق از سکوه‌های تطبیقی استفاده می‌شود. مطالعات و نتایج حاصله از سایر تحقیقات نشان می‌دهد که سکوه‌های پایه‌کششی (TLP)، نوع مناسب از سکوه‌های تطبیقی به شمار می‌آیند. این سکوها سازه‌های شناور بوده که به کمک تاندون‌های پیش کشیده به کف دریا مهار می‌شوند. بخش‌های مهم این سازه عبارت است از فنداسیون، تاندون‌ها، بدنه و عرشه. این سکوها را برای میدان‌های نفتی بزرگ مورد استفاده قرار می‌دهند. عمق آب جهت استفاده از این سکوها از ۱۵۰ متر شروع شده و هیچ‌گونه محدودیتی ندارد. نیروهای بازگرداننده در این سکو به کمک شناوری اضافی که بعد از نصب تاندون‌ها و حذف وزنه تعادلی در بدنه سکو بدست می‌آید، ایجاد می‌گردد. این سکوها را می‌توان دوباره در موقعیت جدید دیگری نصب کرد [۱]. در حالت کلی درجات سختی سکو به دو نوع درجات نرم (yaw, sway, surge) و درجات سخت (roll, pitch, heave) تقسیم می‌شوند [۲].

در این تحقیق سعی بر این بوده تا با مدل سازی یک سکوی پایه‌کششی جهت بدست آوردن رفتار سازه تحت اثر امواج دریا به عنوان مهمترین نیروی وارد بر سکوه‌های دریایی، به منظور به حداقل رساندن حرکت‌های جانبی سازه انجام گیرد.

## ۲- پیشینه تحقیق

رودمن و کلیری [۳] در سال ۲۰۱۳ اثر امواج را به روش دینامیک ذره هموار بررسی نموده‌اند. ابریشمچی و یونس [۴] در سال ۲۰۱۲ بر روی بارهای هیدرودینامیکی وارد بر پایه‌های TLP و جریانهای گردابه ای پشت پایه‌ها متمرکز گردیده‌اند. کیم و همکاران [۵] در سال ۲۰۰۷ پاسخ دینامیکی سکوه‌های پایه‌کششی را تحت اثر امواج منظم بررسی نموده‌اند. باچینسکی و مون [۶] در سال ۲۰۱۲ علاوه بر نیروی موج بر پایه‌ها نیروی باد وارد بر عرشه را که در توربینهای بادی بسیار پراهمیت هستند، در نظر گرفته‌اند و اثر آنها را بر کشش پایه‌ها اعمال نموده‌اند. سنجانوویچ و همکاران [۷] در سال ۲۰۱۳ به بررسی ماتریسهای سختی جدیدی برای تحلیل سکوه‌های پایه‌کششی ارائه داده‌اند. پاسخ دینامیکی سکوی پایه‌کششی

توسط آنجلایدز<sup>۱</sup> و همکاران در سال ۱۹۸۳ مورد بررسی قرار گرفت [۸]. لیونز<sup>۲</sup> و همکاران در سال ۱۹۸۳ بین نتایج تحلیل هیدرودینامیکی و آزمون دو مدل بزرگ، برای پاسخ حرکات TLP تحت اثر امواج و بدون در نظر گرفتن اندرکنش بین اعضای سکو، مقایسه‌ای انجام دادند [۹]. مورگان<sup>۳</sup> و ملایب<sup>۴</sup> با استفاده از یک تحلیل جبری پاسخ دینامیکی سکوی پایه‌کششی را مورد بررسی قرار دادند [۱۰].

## ۳- هیدرودینامیک سکوی پایه‌کششی

معادله حرکت سکوی پایه‌کششی تحت بارگذاری موج در حالت کلی به صورت معادله زیر می‌باشد.

$$\{\ddot{X}\} + [C]\{\dot{X}\} + [K]\{X\} = [F(t)] \quad (1)$$

که در آن [C] و [K] به ترتیب ماتریس‌های میرایی و سختی می‌باشند و {X} بردار جابجایی و [F(t)] بردار نیرو می‌باشد. جرم سازه در هر درجه آزادی متمرکز فرض می‌شود. جرم افزوده بر اثر آب احاطه کننده اطراف اجزای سازه‌ای، در نظر گرفته می‌شود. هم‌چنین مؤلفه متغیر جرم افزوده ناشی از غوطه‌وری متغیر سازه در آب لحاظ می‌گردد. تمام سازه‌هایی که در اندرکنش با سیال قرار می‌گیرند با پدیده فیزیکی جرم افزوده مواجه می‌شوند که اثر میدان نزدیک اطراف سازه محسوب می‌شود.

محاسبه نیروهای هیدرودینامیکی معادلات حرکت جسم صلب با استفاده از معادلات خطی و زاویه‌ای برای حرکات سینوسی به صورت زیر خواهد بود که در رابطه زیر، مقدار  $\zeta$  از ۱ تا ۶ خواهد بود [۱۱ و ۱۲].

$$\sum_{k=1}^6 [(M_{jk} + A_{jk})\ddot{\eta}_k + B_{jk}\dot{\eta}_k + C_{jk}\eta_k] = F_j e^{-it\omega} \quad (2)$$

در رابطه ۲،  $M_{jk}$  مؤلفه‌های ماتریس جرم،  $A_{jk}$  جرم افزوده،  $B_{jk}$  دمپینگ،  $F_j$  دامنه‌های مختلط نیروها و گشتاورهای تحریک و  $F_j e^{-it\omega}$  مؤلفه‌های نیرو و گشتاورهای بخش حقیقی می‌باشند [۱۱ و ۱۲]. نیروی موج به صورت جمع درگ و نیروی اینرسی بیان شود.

<sup>1</sup> Angelides

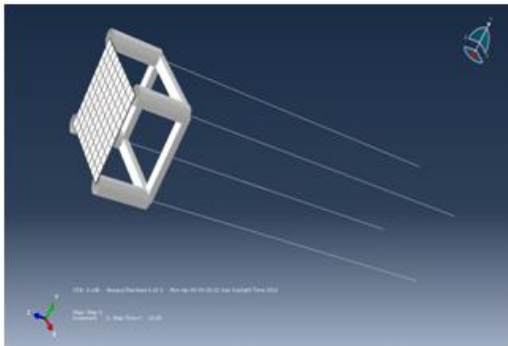
<sup>2</sup> Lyons

<sup>3</sup> Morgan

<sup>4</sup> Malaeb

جدول (۱) مشخصات هندسی سکو.

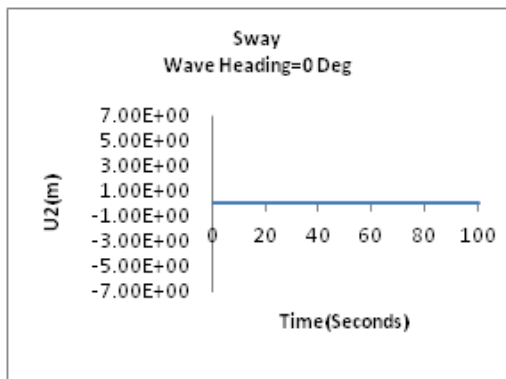
۸۵۸۷/۵ کیلو نیوتن	پیش تنش در هر مهار	۸۶/۴۵ متر	طول سکو (فاصله از مرکز ستون)
۴ مهار	تعداد مهار متصل به هر ستون	۸۶/۲۵ متر	عرض سکو (فاصله مرکز ستون)
۴۰۵۰۰ تن	جرم سکو	۱۶/۸۸ متر	قطر ستون
۴۶۰ متر	عمق آب	۷/۵ متر	عرض پانتون
۰/۱۲۵۶۶	مساحت مقطع مهار	۱۰/۵ متر	ارتفاع پانتون



شکل (۱) تصویر مش بندی شده سکو در نرم افزار ABAQUS

### ۵- نتایج

تحلیل هیدرودینامیکی این سکو در حالت حدی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج خروجی نیز دسته بندی و مرتب شدند. پارامترهای مهم پاسخ سکوهای پایه کششی جابجایی افقی، قائم و زاویه ای می باشند که در شکل های (۲) تا (۲۵) ارائه شده اند.



شکل (۲) پاسخ سکو برای حرکت Sway - زاویه موج صفر درجه.

معادله نیروی موج به صورت زیر قابل محاسبه می باشد:

$$F = F_d + F_i$$

$$F_d = \frac{1}{2} \rho_w C_D D |u - \dot{x}| (u - \dot{x})$$

$$F_i = \frac{\pi}{4} \rho_w C_A D^2 (\dot{u} - \ddot{x}) + \frac{\pi}{4} \rho_w D^2 \dot{u} = \frac{\pi}{4} \rho_w D^2 (C_M \dot{u} - C_A \ddot{x}) \quad (3)$$

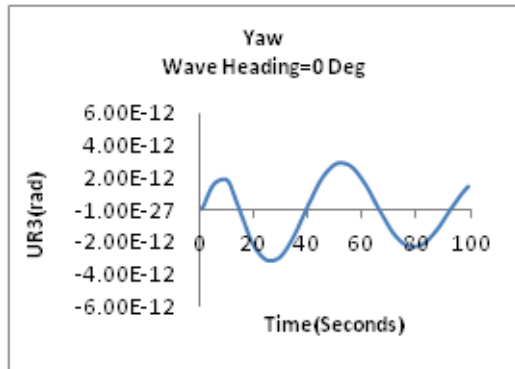
مقادیر قابل قبول ضریب ضرایب درگ بین ۰/۶ تا ۱/۲ می باشد. همچنین بسته به شرایط محیطی که سکو در آن نصب می شود، پس از مدتی افزایش قطر ناشی از رشد جلبک ها و سایر موجودات دریایی روی اعضای سازه ای و غیرسازه ای مشاهده می شود. علاوه بر افزایش قطر، سطح صاف اعضا نیز به سطوح زبر تبدیل شده و در نتیجه ضرایب اینرسی و درگ موج نیز تغییر می یابد که باید در محاسبات مدنظر قرار گیرد [۱۳ و ۱۴].

### ۴- معرفی مدل

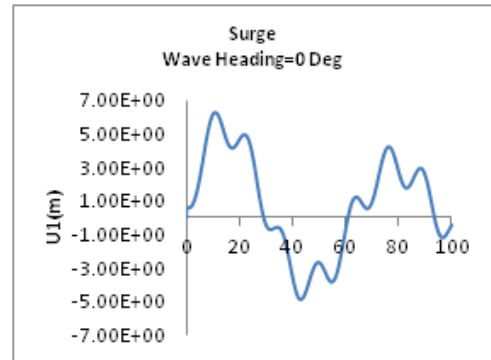
سکوی مورد مطالعه در این تحقیق یک سکوی پایه کششی دارای پلان مربع و ۴ ستون می باشد. مشخصات هندسی سکوی مورد نظر به همراه مشخصات مکانیکی مهارهای آن که در جدول (۱) آورده شده است در نرم افزار المان محدود ABAQUS مدل سازی شده است.

در سکوهای پایه کششی پاسخ های جابجایی سکو در ۶ جهت از اهمیت زیادی برخوردار است. در مدل سازی نرم افزار المان محدود در تمام ابعاد هندسی بدنه از رابطه موريسون استفاده شده است. در تحلیل این سکو در نرم افزار ABAQUS از تحلیل تاریخچه زمانی استفاده می گردد. با در نظر گرفتن نواحی جنوب غربی دریای خزر جهت جانمایی سکو، برای تعیین موج طرح از اطلاعات موج این محدوده از دریای خزر استفاده شده است. با استفاده از نقشه ارتفاع مشخصه موج در دوره بازگشت ۱۰۰ ساله، موجی با ارتفاع ۶ متر و دوره تناوب ۱۳ ثانیه به سکوی مورد نظر تحت زوایای مختلف تابیده شد و تحلیل استاتیکی و دینامیکی بر روی سکو انجام شد. نتایج این تحلیل شامل حرکت های جانبی و حرکات چرخشی سکو حاصل از نیروی شناوری مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۱) تصویر مش بندی شده مدل در نرم افزار ABAQUS آورده شده است.

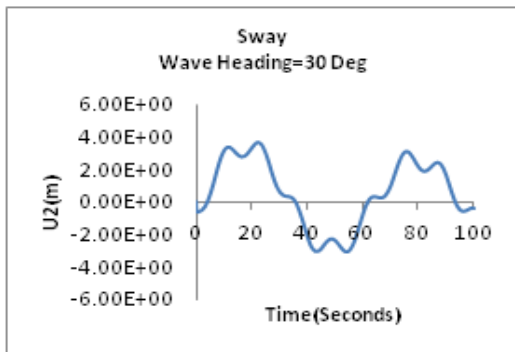
<sup>1</sup> Marine Growth



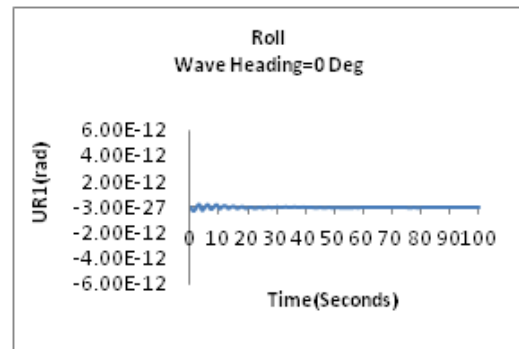
شکل (۷) پاسخ سکو برای حرکت Yaw - زاویه موج صفر درجه.



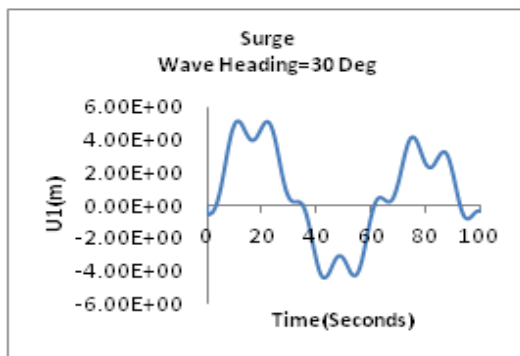
شکل (۳) پاسخ سکو برای حرکت Surge - زاویه موج صفر درجه.



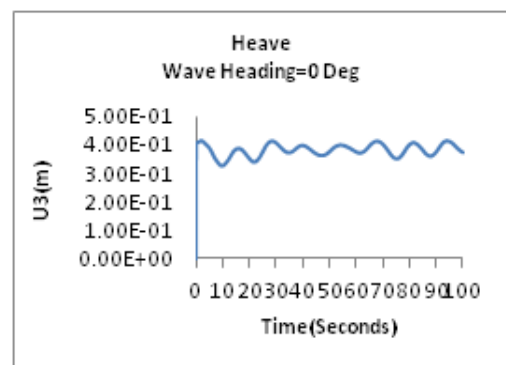
شکل (۸) پاسخ سکو برای حرکت Sway - زاویه موج ۳۰ درجه.



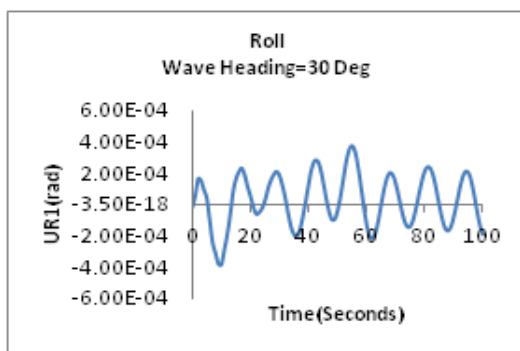
شکل (۴) پاسخ سکو برای حرکت Roll - زاویه موج صفر درجه.



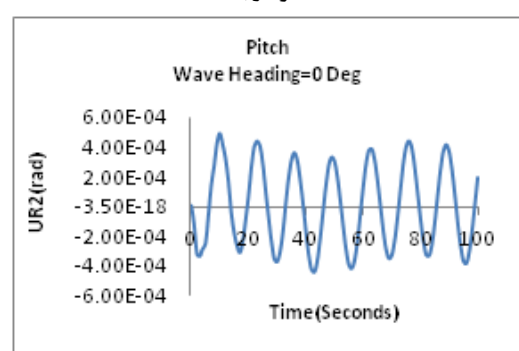
شکل (۹) پاسخ سکو برای حرکت Surge - زاویه موج ۳۰ درجه.



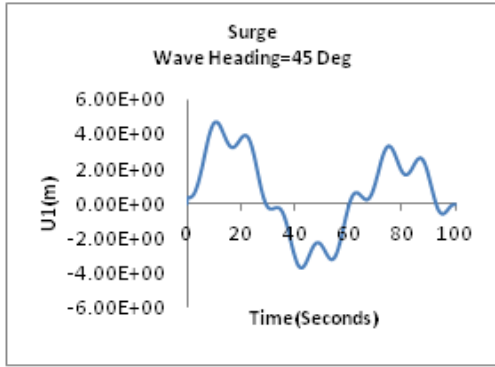
شکل (۵) پاسخ سکو برای حرکت Heave - زاویه موج صفر درجه.



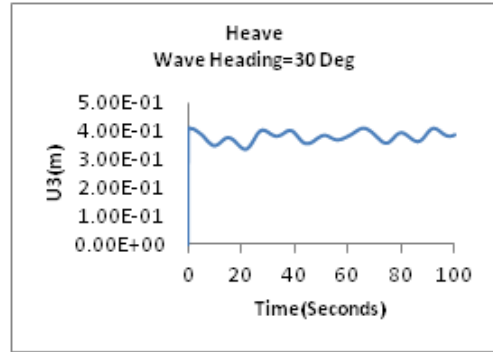
شکل (۱۰) پاسخ سکو برای حرکت Roll - زاویه موج ۳۰ درجه.



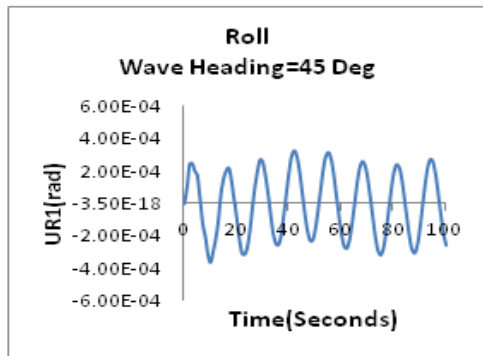
شکل (۶) پاسخ سکو برای حرکت Pitch - زاویه موج صفر درجه.



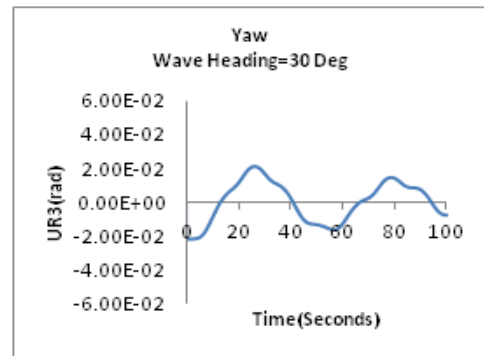
شکل (۱۵) پاسخ سکو برای حرکت Surge - زاویه موج ۴۵ درجه.



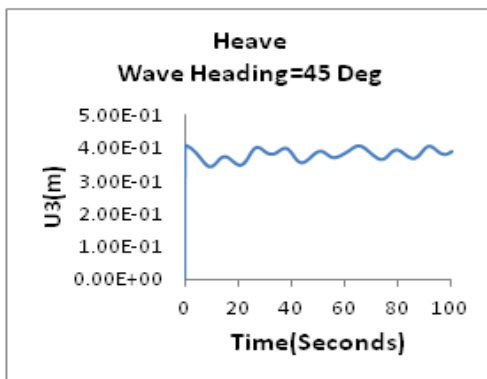
شکل (۱۱) پاسخ سکو برای حرکت Heave - زاویه موج ۳۰ درجه.



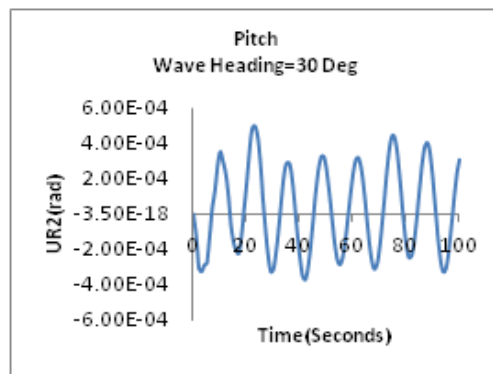
شکل (۱۶) پاسخ سکو برای حرکت Roll - زاویه موج ۴۵ درجه.



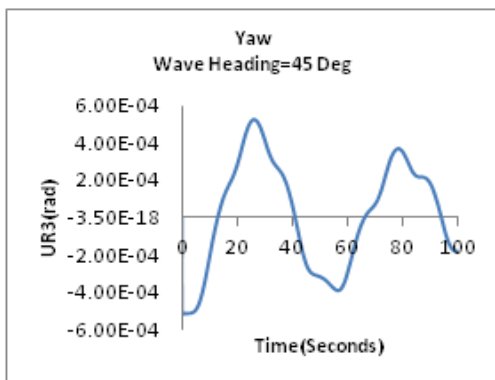
شکل (۱۲) پاسخ سکو برای حرکت Yaw - زاویه موج ۳۰ درجه.



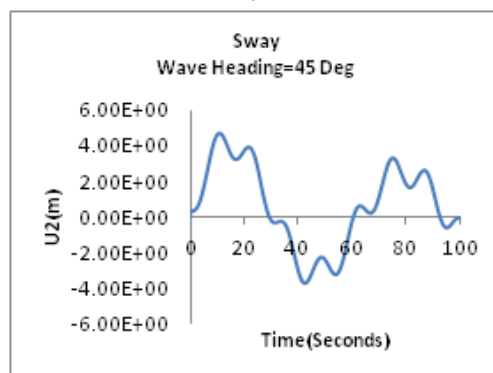
شکل (۱۷) پاسخ سکو برای حرکت Heave - زاویه موج ۴۵ درجه.



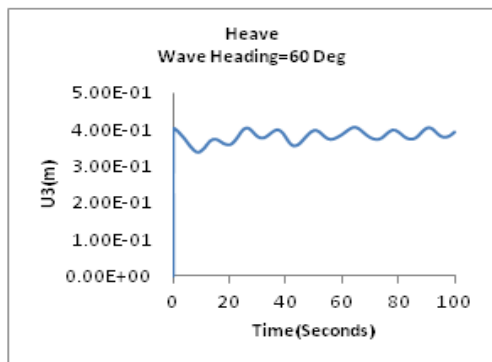
شکل (۱۳) پاسخ سکو برای حرکت Pitch - زاویه موج ۳۰ درجه.



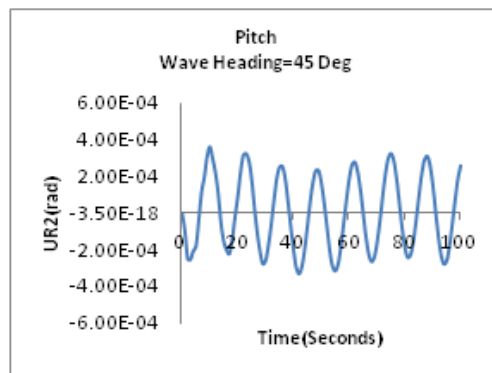
شکل (۱۸) پاسخ سکو برای حرکت Yaw - زاویه موج ۴۵ درجه.



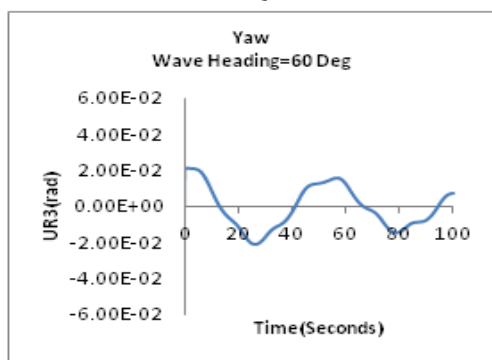
شکل (۱۴) پاسخ سکو برای حرکت Sway - زاویه موج ۴۵ درجه.



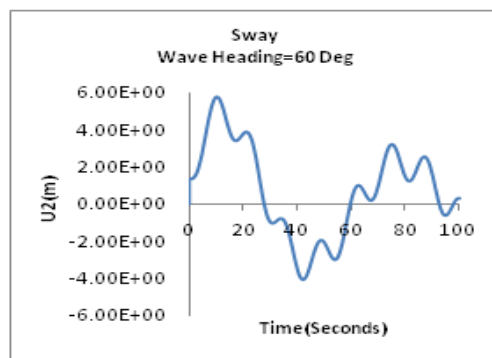
شکل (۲۳) پاسخ سکو برای حرکت Heave- زاویه موج ۶۰ درجه.



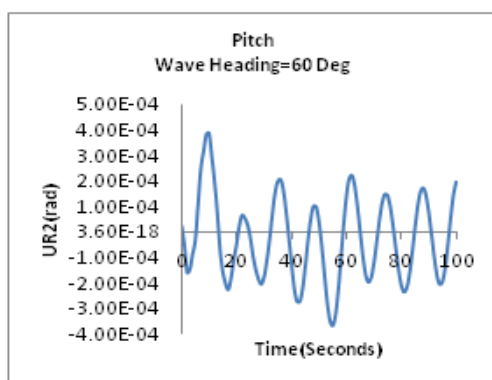
شکل (۱۹) پاسخ سکو برای حرکت Pitch - زاویه موج ۴۵ درجه.



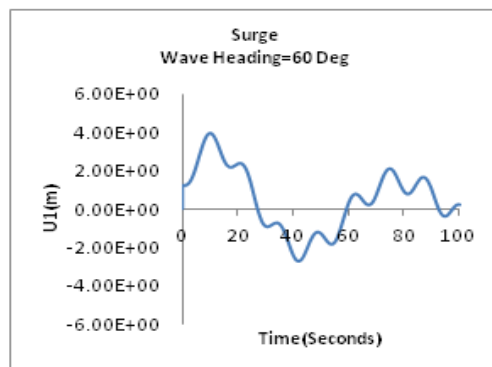
شکل (۲۴) پاسخ سکو برای حرکت Yaw - زاویه موج ۶۰ درجه.



شکل (۲۰) پاسخ سکو برای حرکت Sway - زاویه موج ۶۰ درجه.



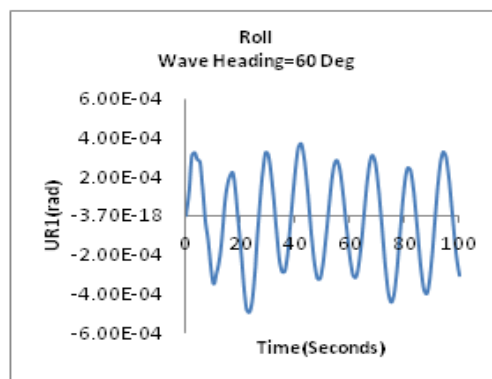
شکل (۲۵) پاسخ سکو برای حرکت Pitch - زاویه موج ۶۰ درجه.



شکل (۲۱) پاسخ سکو برای حرکت Surge - زاویه موج ۶۰ درجه.

#### ۶- جمع بندی و نتیجه گیری

با افزایش زاویه برخورد موج از صفر تا ۶۰ درجه، روند تغییرات پاسخ سازه برای حرکت Surge روندی کاهشی، برای حرکت sway روندی افزایشی و برای حرکت Heave تغییر محسوسی ندارد. همان طور که در پاسخ های Heave سکو مشاهده می شود، در لحظات اولیه تحلیل طبق قانون هوک تاندون ها به علت نیروی وارده از طرف امواج دچار افزایش طول اولیه شده اند و بعد از آن جابجایی های نوسانی ناچیزی را در این حرکت مشاهده می کنیم.



شکل (۲۲) پاسخ سکو برای حرکت Roll - زاویه موج ۶۰ درجه.

- Offshore Technology Conference, Vol. 3, No. 43, pp.1-6, May 1983.
- [10] Morgan, J., "Dynamic Analysis of Tension-Leg Platforms", 2<sup>nd</sup> International Offshore Mechanics and Arctic Engineering Symposium, pp.31-31, 1993.
- [11] Faltinsen, O., "Sea Loads on Ships and Offshore Structures", Cambridge Ocean Technology Series, Cambridge University Press, p. 340, Sep. 1993.
- [12] M. A. El-Reedy, "Offshore Structures: Design, Construction and Maintenance", Gulf Professional Publishing, first edition, 2012.
- [13] American Petroleum Institute, "Recommended Practice for Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms", 21<sup>th</sup> Working Stress Design, p. 274, 2010.
- [14] Low, Y. M., "Frequency Domain Analysis of a Tension Leg Platform with Statistical Linearization of the Tendon Restoring Forces", Marine Structures, Vol. 22, No. 3, PP. 480-503, 2009.
- [15] Piskarev, A. L., Shkatov, M. Y., "Prospecting, Exploration, and Development of Oil-and-Gas Fields in the Twentieth Century", Developments in Petroleum Science, Vol. 58, PP. 1-56, 2012.

حداکثر پاسخ سکو در حرکات Surge و Sway و همچنین در حرکات Roll و Pitch در زاویه برخورد موج مکمل تقریباً یکسان می‌باشد. پاسخ سکو برای حرکات Roll، Pitch و Yaw بسیار ناچیز می‌باشد. سکوی مورد نظر با ابعاد معین، برای منطقه مشخص شده در دریای خزر [۱۵] با در نظر گرفتن شرایط امواج و زوایای مختلف برخورد موج با توجه به محاسبات صورت گرفته از لحاظ هیدرودینامیکی مناسب می‌باشد و اطلاعات بدست آمده از پاسخ‌های سکو در طراحی هیدرودینامیکی سکو بسیار مفید و حائز اهمیت خواهد بود.

#### ۷- مراجع

- [1] Chandrasekaran, S., Jain, A., Gupta, A., and Srivastava, A., "Response Behaviour of Triangular Tension Leg Platforms Under Impact Loading", Ocean Engineering, Vol. 34, No. 1, pp. 45-53, Jan. 2007.
- [2] Chandrasekaran, S., and Jain, A., "Dynamic Behaviour of Square and Triangular Offshore Tension Leg Platforms Under Regular Wave Loads", Ocean Engineering, Vol. 29, No. 3, pp. 279-313, Mar. 2002.
- [3] Rudman, M. and Cleary, P. W., "Rogue Wave Impact on a Tension Leg Platform: The effect of Wave Incidence Angle and Mooring Line Tension." Ocean Engineering, Vol. 61, No. 15, PP. 123-138, 2013.
- [4] Abrishamchi, A. and Younis, B. A., "LES and URANS predictions of the hydrodynamic loads on a tension-leg platform", Journal of Fluids and Structures, Vol. 28, PP. 244-262, 2012.
- [5] Kim, C. H., Lee, C. H. and Goo, J. S., "A Dynamic Response Analysis of Tension Leg Platforms Including Hydrodynamic Interaction in regular waves", Journal of Ocean Engineering, Vol. 34, No. (11-12), PP. 1680-1689, 2007.
- [6] Bachynski, E. E. and Moan, T., "Design Considerations for Tension Leg Platform Wind Turbines", Marine Structures, Vol. 29, No. 1, PP. 89-114, 2012.
- [7] Senjanović, I., Tomić, M. and Rudan, S., "Investigation of Nonlinear Restoring Stiffness in Dynamic Analysis of Tension Leg Platforms", Engineering Structures, Vol. 56, PP. 117-125, 2013.
- [8] Angelides, D., Chen, C. Y., and Will, S., "Dynamic Response of Tension Leg Platform", 3<sup>rd</sup> International Conference on Behaviour of off-Shore Structures, pp. 100-120, 1983.
- [9] Lyons, G., Patel, M., Sarohia, S. and Hartnup, G., "Theory and Model Test Data For Tether Forces on Tensioned Buoyant Platforms", 15<sup>th</sup>